УДК 621.313.062.4:621.314.632

ЗАВИСИМОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ В НАДСИНХРОННОМ ВЕНТИЛЬНОМ КАСКАДЕ

Ю.Н. Дементьев, А.А. Расстригин

Томский политехнический университет
E-mail: epatpu@mail2000.ru

Рассмотрена схема надсинхронного вентильного каскада с промежуточным звеном постоянного тока и один из самых простых и надежных способов зависимого управления вентилями роторного преобразователя по потокосцеплению ротора. Представлены уравнения, поясняющие принцип управления, приведены основные выражения для расчета статических характеристик надсинхронного вентильного каскада, а также расчетные характеристики управления и статические механические характеристики.

В связи с актуальностью вопросов рационального и бережного использования топливно-энергетических ресурсов в настоящее время значительно возрос интерес к регулируемым электроприводам переменного тока из-за необходимости их применения для механизмов, которые традиционно были нерегулируемыми. Проблема создания экономичного, регулируемого асинхронного электропривода решается в настоящее время путем расширения областей применения частотного регулирования и каскадных схем с использованием вентильных преобразователей. Перспективными представляются системы экономичного электропривода с полезным использованием энергии скольжения [1–3], в частности, надсинхронный вентильный каскад (НВК), рис. 1.

В НВК активная энергия на скорости выше синхронной потребляется как статором, так и ротором (режим двойного питания) асинхронной машины с фазным ротором (АМ), что позволяет с вала двигателя снимать большую мощность или же при заданной мощности рабочей машины снизить установленную мощность двигателя и вентильного преобразователя, включенного в роторную цепь. Использование в НВК вентильного преобразователя с промежуточным звеном постоянного тока и естественной коммутацией вентилей значительно его упрощает, повышает надежность, КПД [3].

Во многом работа НВК, рис. 1, зависит от способа коммутации вентилей роторного вентильного преобразователя (РП). Если открывать тиристоры РП по сигналу независимо от двигателя, то получим электропривод с независимым управлением. В таком электроприводе скорость ротора оказывается независимой от нагрузки и пропорциональной задаваемым частотам статора и ротора. Это делает электропривод склонным к неустойчивости.

Поэтому на практике обычно используется так называемое зависимое управление (самоуправление), т.е. вентили РП открывают с частотой, изменяющейся пропорционально частоте вращения ротора асинхронной машины, а коммутацию тока во всех режимах (за исключением области синхронной скорости) осуществляют с помощью напряжения, индуктированного в роторе (машинная коммутация). Момент начала коммутации определяется сигналом, пропорциональным какому-либо сиг-

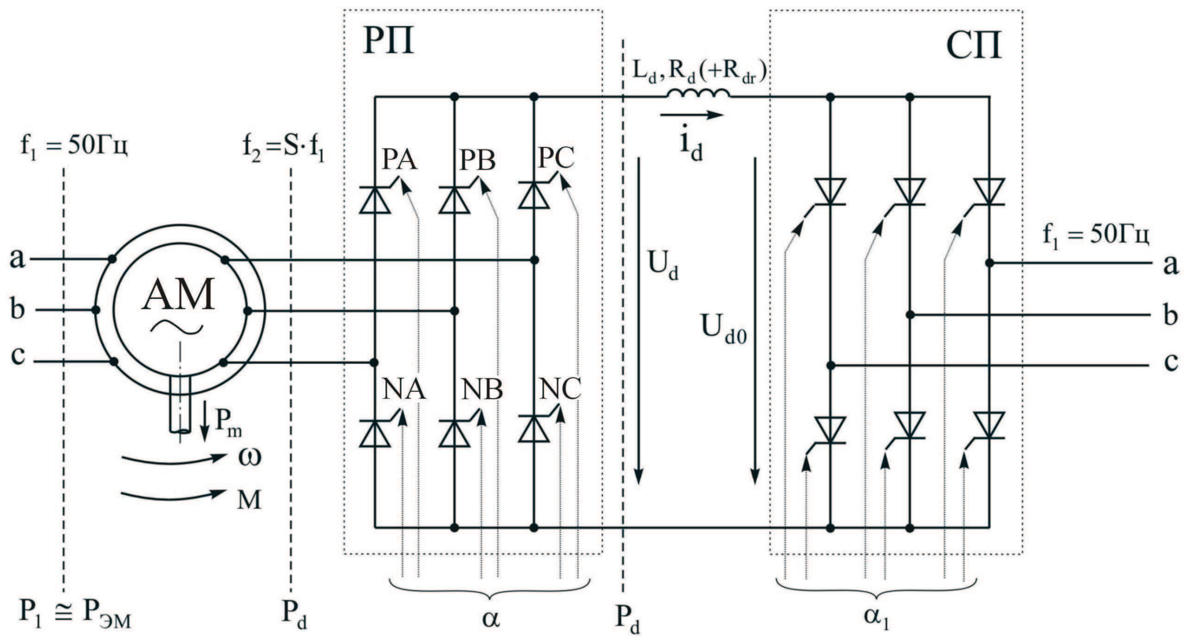


Рис. 1. *Электропривод по схеме надсинхронного вентильного каскада*

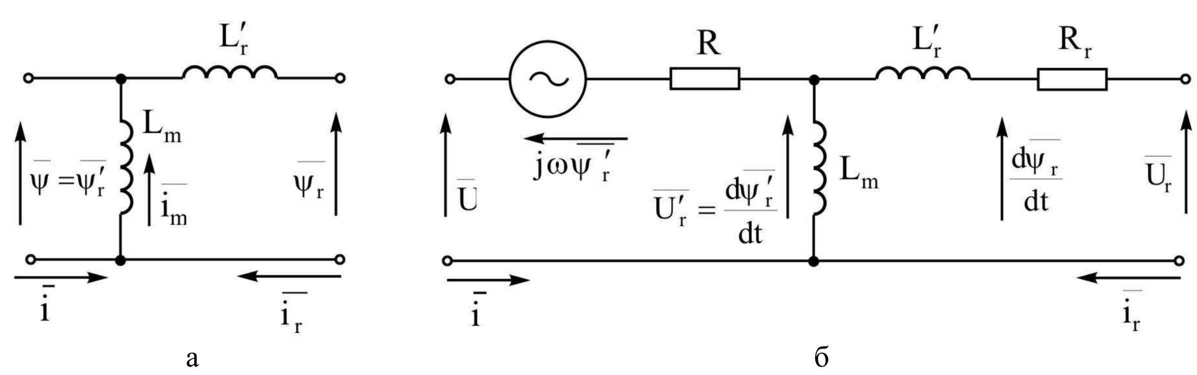


Рис. 2. *Схемы замещения АМ для: а) потокосцеплений и б) напряжений*

налу ротора АМ, а длительность коммутации – реактивными сопротивлениями машины.

Одним из самых простых и надежных способов при практической реализации зависимого управления РП в НВК является управление по какому-либо потокосцеплению ротора [4, 5]. Для напряжений и потокосцеплений роторной цепи АМ действительны схемы замещения, рис. 2 (за счет выбора коэффициента приведения к роторной цепи индуктивность рассеяния статора обращается в нуль) [6].

На основе схемы замещения, рис. 2, *а*, для векторов потокосцепления можно записать:

$$\overline{\psi}'_r = \overline{\psi}_r - L'_r\overline{i}_r. \qquad (1)$$

Если потокосцепление ротора получить интегрированием, согласно схеме замещения, рис. 2, *б*, из следующего выражения:

$$\overline{\psi}_r = \int(\overline{U}_r - R_r\overline{i}_r)dt, \qquad (2)$$

то согласно (1, 2) можно определить любое потокосцепление ротора (например, потокосцепление управления):

$$\overline{\psi}_{3r} = \overline{\psi}_r - L_3\cdot\overline{i}_r = \overline{\psi}'_r - (L_3 - L'_r)\cdot\overline{i}_r, \qquad (3)$$

где L'_r – переходная индуктивность ротора, L_3 – индуктивность задания.

Таким образом, согласно (3), варьируя значениями индуктивности задания, можно установить любое желаемое потокосцепление управления. Например, если $L_3=L'_r$, то управление открыванием тиристоров РП будет осуществляться по переходному потокосцеплению ротора $\overline{\psi}'_r$; если $L_3=0$, то управление открыванием тиристоров РП будет происходить по потокосцеплению ротора $\overline{\psi}_r$. Момент открывания тиристоров РП зависит от положения вектора потокосцепления управления $\overline{\psi}_{3r}$. Коммутация тиристоров РП происходит его определенных положениях вектора в момент времени открывания t_k. Как показано на рис. 3, *а*, в режиме подсинхронной скорости тиристор NC, а на рис. 3, *б*, в режиме надсинхронной скорости тиристор NB открываются в момент времени t_k, если выполняются следующие условия:

$$\omega\langle\omega_0, NC: \angle\overline{\psi}_{3r}(t_k) = \frac{\pi}{2} + \alpha_3,$$

$$\omega\rangle\omega_0, NB: \angle\overline{\psi}_{3r}(t_k) = -(\frac{\pi}{2} + \alpha_3).$$

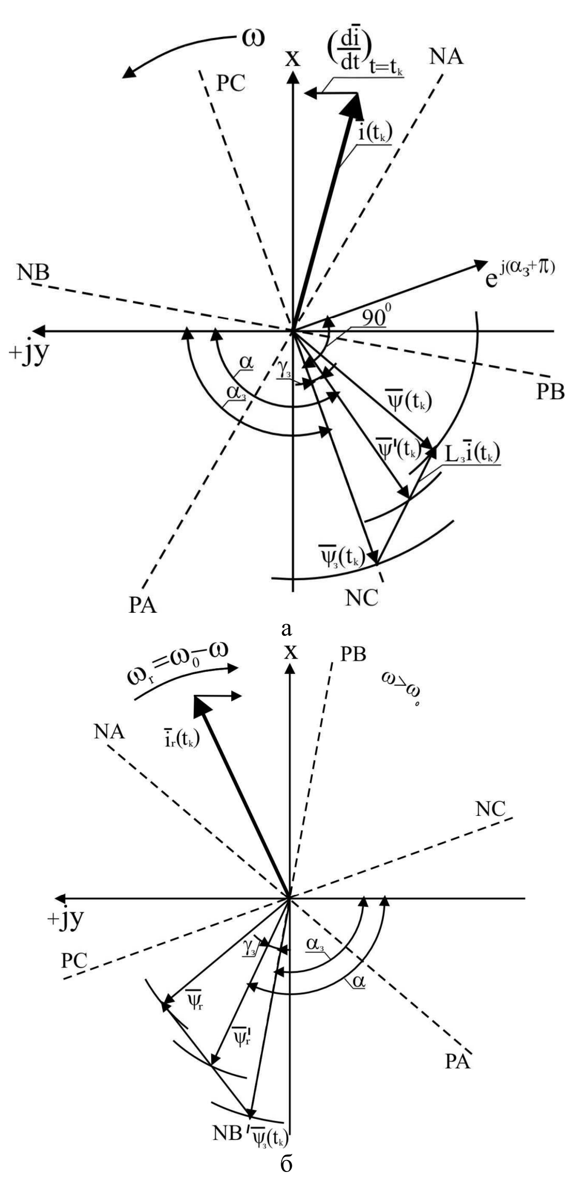


Рис. 3. *Векторные диаграммы НВК при управлении по потокосцеплению: а) $\omega<\omega_0$, б) $\omega>\omega_0$*

Очередной тиристор открывается, когда вектор потокосцепления управления $\overline{\psi}_{3r}$ повернется на 60° относительно своего положения в предыдущей коммутации. На рис. 3 штрихпунктирные линии означают моменты открывания тиристоров РП.

Для упрощения аналитических выражений, по которым можно определить основные величины (ток, напряжение, потокосцепление и т.д.) вентильного роторного преобразователя в надсинхронном вентильном каскаде, примем следующие допущения:

- Угловая скорость вращения ротора постоянна;
- Активное сопротивление статора равно нулю;
- Выпрямленный ток идеально сглажен;
- Активное сопротивление ротора равно нулю.

На основании принятых допущений, например, для тиристора NB (рис. 3) можно записать:

$$\overline{\psi}'_r(t_k) = \Psi'_r \cdot e^{-j(\pi/2+\alpha)}, \quad \overline{i}'_r(t_k) = (2/\sqrt{3}) \cdot I_d \cdot e^{j(\pi/6)},$$

$$\overline{\psi}_{зr}(t_k) = \Psi_{зr} \cdot e^{-j(\pi/2+\alpha_з)} = \overline{\psi}'_r(t_k) - (L_з - L'_r) \cdot \overline{i}'_r(t_k).$$

Учитывая допущение о пренебрежении активным сопротивлением ротора, величина среднего выпрямленного тока РП в НВК для углов коммутации δ<60° определится по выражению [2]:

$$I_d = (\sqrt{3}/2) \cdot (\Psi'_r / L'_r) \cdot [\cos\alpha - \cos(\alpha + \delta)],$$

где $\Psi'_r/L'_r = I_{кз}$ – ток идеального короткого замыкания роторной цепи.

Действительный угол открывания α можно рассчитать по выражению

$$\alpha = \operatorname{arctg}\frac{\sin\alpha_з + l \cdot (1-\cos\delta) \cdot \cos(\alpha_з + \pi/6)}{\cos\alpha_з - l \cdot \sin\delta \cdot \cos(\alpha_з + \pi/6)} = \alpha_з + \gamma_з, \quad (4)$$

где $l = 1 - L_з/L'_r$, $\alpha_з$ – угол задания вектора потокосцепления управления в момент открывания тиристора, $\gamma_з$ – угол между векторами потокосцеплений управления $\overline{\psi}_{зr}$ и ротора $\overline{\psi}'_r$.

Из (4) следует, что действительный угол открывания α зависит от переходной индуктивности асинхронной машины L'_r, от величины индуктивности задания $L_з$ и угла управления задания соответственно $\alpha_з$, а также от нагрузки δ. Кроме того, из выражения (4) видно, что при увеличении нагрузки действительный угол открывания α отклоняется от угла открывания при идеальном холостом ходе $\alpha_0 = \alpha(\delta=0) = \alpha_з$. Это отклонение зависит от того, по какому потокосцеплению производится управление. Например, при возрастании нагрузки, если принять $L_з = L'_r$, угол открывания α остается постоянным; при $L_з > L'_r$ угол α возрастает ($\gamma_з$>0), а при $L_з < L'_r$ – уменьшается ($\gamma_з$<0).

На рис. 4 представлены расчетные характеристики управления $\alpha = f(\delta)$ для нескольких значений индуктивности задания $L_з$ и угла управления задания $\alpha_з$ при работе РП в инверторном режиме. Регулировочные характеристики рассчитаны при значении переходной индуктивности асинхронной машины L'_r=0,2. Здесь же приведены граничная характеристика опрокидывания инвертора $\alpha+\delta$=180° и характеристика нагрузки δ=60°, а также характеристики $\alpha+\delta$=150° и $\alpha+\delta$=160°, при которых обеспечивается надежный режим работы РП и в целом НВК в динамическом режиме.

При работе РП в инверторном режиме угол открывания α необходимо устанавливать и поддерживать наибольшим из возможных (в идеальном случае $\alpha+\delta$=180°). В случае управления РП в НВК по потокосцеплению ротора и выборе оптимальных значений заданий угла управления $\alpha_з$ и индуктивности $L_з$ в рабочем диапазоне нагрузки (δ≤30°) угол $\alpha+\delta$ остается практически постоянным. Это объясняется тем, что при самоуправлении РП в НВК по потокосцеплению, как видно из (4), возрастание угла нагрузки δ большей частью компенсируется возрастанием отрицательного угла $\gamma_з$. Чем меньше переходная индуктивность ротора L'_r АМ,

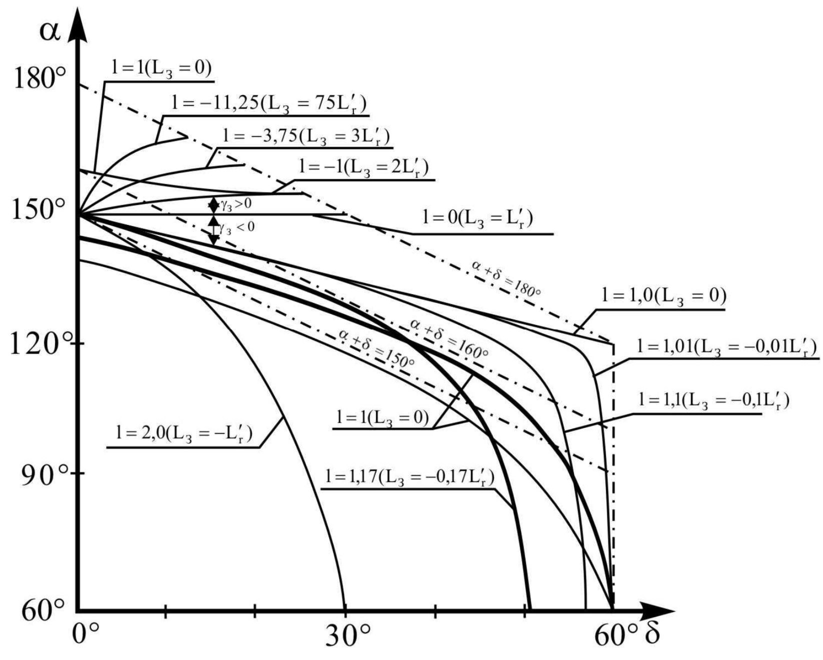


Рис. 4. *Расчетные характеристики управления НВК*

тем ближе можно подойти к граничной характеристике опрокидывания $\alpha+\delta$=180° РП, работающего в инверторном режиме, достичь большего угла $\alpha+\delta$ и обеспечить наилучшее использование РП и АМ.

При $\alpha_з$=150°, $L_з$≤0, а также при $L_з$=0, $\alpha_з$<145° невозможно достичь режима опрокидывания. При выборе $L_з$=0 и $\alpha_з$=150° НВК всегда работает в устойчивом режиме, а действительный угол открывания определяется по следующей упрощенной формуле

$$\alpha = 150^{\circ} - \delta / 2, \text{ т.е. } \alpha + \delta = 150^{\circ} + \delta / 2 (\gamma_з = -\delta / 2).$$

Как видно из рис. 4, расчетные характеристики управления, имеющие значения параметров задания $\alpha_з$=150°, $L_з$=–0,17, $L_з$=–0,1 или $L_з$=0, являются наиболее целесообразными для установки блока зависимого управления РП соответственно нагрузке, т.к. при этом обеспечивается приблизительно постоянное значение динамического запаса от границы опрокидывания ($\alpha+\delta$=180°) РП, работающего в инверторном режиме во всем рабочем диапазоне изменения нагрузки и надежный режим работы НВК.

Однако расчет статических характеристик, исследования НВК на устойчивость и экспериментальные исследования на реальном электроприводе показали, что значения индуктивности задания не могут иметь большие отрицательные значения, т.к. может наступить режим неустойчивой работы НВК.

Приведем основные выражения, по которым можно рассчитать статические механические характеристики НВК при самоуправлении РП по потокосцеплению ротора [1, 4, 5].

Механические характеристики НВК (ω – угловую скорость, M – электромагнитный момент) можно рассчитать по ниже приведенным выражениям, предварительно определив действительный угол открывания α по выражению (4) для заданных значений угла нагрузки δ.

$$\omega = \omega_0 - s^* \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \frac{U_d}{\Psi'_r [\cos\alpha + \cos(\alpha + \delta)]},$$

где ω_2=ω_r=ω_0–ω – угловая скорость вращения магнитного поля, создаваемого обмоткой ротора; ω_0 – угловая скорость вращения магнитного поля, создаваемая обмоткой статора; s^*=sign$S$, S – скольжение асинхронной машины.

$$M = s^* \frac{3\Psi'_r}{4\pi L'_r} [\cos\alpha + \cos(\alpha + \delta)].$$

На рис. 5 представлены расчетная естественная механическая характеристика асинхронной машины и расчетные статические механические характеристики ω=f(M) НВК для нескольких установочных значений задания $L_з$ и $\alpha_з$=150° при работе РП в инверторном режиме. Анализ этих характеристик подтверждает, что при выборе больших отрицательных значений $L_з$ (например, при $L_з$=–0,2) может наступить неустойчивый режим работы НВК при самоуправлении РП по потокосцеплению.

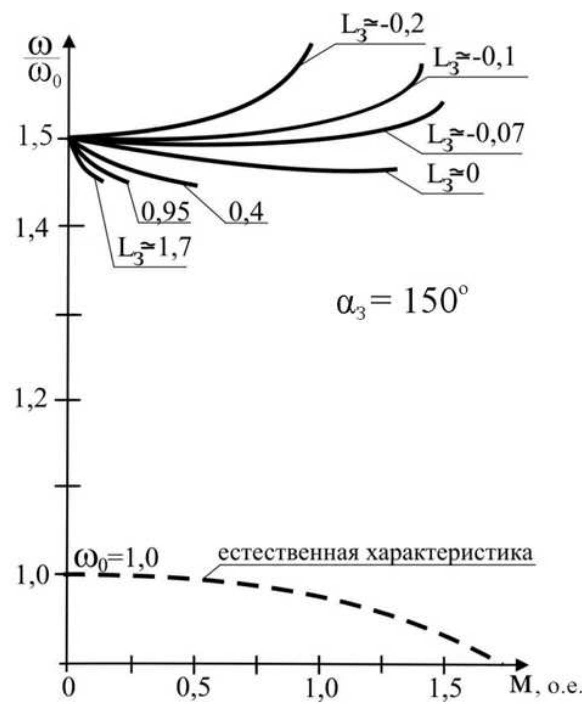


Рис. 5. *Статические и механические характеристики НВК*

Предлагаемый способ завимсимого управления преобразователем достаточно прост при практической реализации и обеспечивают надежную работу электропривода по схеме надсинхронного вентильного каскада. Способ может быть рекомендован для вентильных электроприводов на базе синхронной машины с зависимым инвертором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Csörgits F. Die Kennlinien der untersynchroner Stromrichterkaskade // Period. Politechn. El. Eng. – 1970. – № 14. – S. 212–218.
2. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники. – М.: Высшая школа, 1974. – 430 с.
3. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Вентильные каскады и двигатели двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 174 с.
4. Schmidt I., Dementyev J.N., Farkas A. Gépi kommutacios szinkron feletti tirisztoros aszinkron motoros kaszkad // Elektrotechnika. – 1984. – № 5–6. – O. 160–166.
5. Schmidt I., Dementyev J.N., Hajevszki F. Szabalyozott szinkron feletti kaszkad hajtas // Elektrotechnika. – 1985. – № 9–10. – O. 394–400.
6. Schmidt I., Vincze K., Veszpremi K. Adaptive hysteresis current vector controls of synchronous servo drive // Elektromotion. – 1999. – № 1–2. – P. 19–24.